



1



2


東京大学生産技術研究所
 Institute of Industrial Science, The University of Tokyo
 

産学官連携により競争力のある早期製造技術開発を目指す
 Efficiently develop aircraft manufacturing technology through industry-academia-government collaboration and maintain the technical advantage of our country.

難削材料を安く早く加工する技術課題
 High Speed and low cost cutting of difficult-to-cut materials

組立作業の自動化課題
 Automation of assembly work

- ・難削材料の高速切削加工 CFRP, チタン合金, Al-Li合金
- ・Near net shape 3Dプリント(メタル), 熱間接合, 熱間ストレッチ
- ・ロボット利用技術 ロボット切削, ロボットシーリング

産業界(12社)	大学	官・行政
Boeing 三菱重工業 川崎重工業 SUBARU DMG森精機 出光興産 京セラ	丸菱工業 KAI 佐藤精研 青山精工 東京貿易テクノシステム 東京大学 生産技術研究所 東京農工大学 東京電機大学 広島大学	経済産業省 製造産業局 航空機武器宇宙産業課 NEDO 材料・ナノテクノロジー部

3


東京大学生産技術研究所
 Institute of Industrial Science, The University of Tokyo
 

研究拠点
 Research base

柏地区 Kashiwa campus
 ・切削加工関係研究課題 Cutting process relation research
 ・成型加工関係研究課題 Molding process relation research

駒場地区 Komaba II campus
 ・組立関係研究課題 Assembly Relation Research

委託先(東京農工大, 東京電機大, 広島大)
 Subcontractor Tokyo University of Agriculture and Technology Tokyo Denki University Hiroshima University

- ・残留応力シミュレーション関係課題
- およびロボット高精度制御関係課題

4



5



6



・研究成果概要

Outline of research results



7

6軸制御の誤差予測 (オフライン補正)
Error prediction of 6-axis control (offline correction)




広島大学 茨木研究室

目的 Purpose

6軸ロボットの絶対的位置決め精度を、可動領域全体で保証するための、新しいオフライン補正法の開発。任意の指令点に対して、ロボットの位置決め誤差を高い精度で予測できる、従来研究にない新しいモデルを提案する。

Development of a new offline compensation scheme for a six-axis robot to ensure its absolute positioning accuracy over the entire workspace. The project proposed a new model to predict a robot's positioning error in significantly higher prediction accuracy.



成果 Achievements

左図は実測軌跡、右図は提案モデルで予測した軌跡である。従来モデルよりはるかに高い精度で、誤差を予測することができた。 Left: measured trajectories, Right: Predicted by the proposed model. Proposed model showed significantly higher prediction accuracy than conventional model.

Error scale: 2000 μ m



測定軌跡 Measured

Error scale: 2000 μ m



予測軌跡 Predicted

新提案 New proposal

全ての回転軸の角度誤差をモデル化したのに加えて、自重に対する重力によって角度誤差が変化する影響もモデル化した。

Angular positioning errors of all the rotary axes are modelled. Additionally, the influence of the gravity on angular positioning errors is modelled.




姿勢によって A2軸の角度誤差が変化する
A2-axis angular positioning error can change with robot pose

今年度の課題 Challenges for this year

ロボット切削の加工面の外観を改善するため、ロボットの姿勢誤差の測定とモデル化に取り組む。

To improve surface finish by robotic machining, a robot's orientation errors will be measured and modeled.

工作機械に使われるレーザ干渉計を用いたロボットの姿勢測定
Orientation error measurement by a laser interferometer, typically used for machine tools



8

三次元位置測定制御技術の基礎的開発 (オンライン補正)


Basic development of 3D position measurement control technology (online control)

目的 Purpose

6軸多関節ロボットを用いた新しい切削加工システムの開発
Development of a new system using a 6-axis articulated robot

ロボットでの作業は現在はバリ取りなど精度が低くてもできる作業のみ実用化されている。この研究ではロボットの軌跡精度を航空機向け部品が製造可能なレベルに向上し切削システムを構築する。既存の手法より環境負荷を小さくする。また、大きな部品の少量多品種生産ではロボットの動作範囲の広さが利点となると考えられる。

Currently, only work that can be done with low accuracy, such as deburring, has been put into practical use with industrial robots. The goal of this research is to improve the trajectory accuracy of the robot to a level where aircraft parts can be manufactured and to construct a cutting system. This method will have a smaller environmental impact than before. In addition, the wide motion range of the robot will be an advantage in small-lot, high-mix production of large parts.




6軸多関節ロボット
6-axis articulated robot

加工用モータユニット
Milling head


内容 Contents

ロボット外部からより正確な座標を測定し、本来のロボット制御コンピュータの外部から、理想軌跡との誤差をリアルタイムにフィードバックする。制御する軸数をXYZの3軸に増やした。

More accurate coordinates are measured from the outside of the robot, and the error from the ideal trajectory is fed back in real time from the outside of the original robot control computer to correct it. The number of axes to control has been increased to 3 axes of XYZ.



オンライン補正システムの概略
Outline of online correction system



金属加工による性能評価
Performance evaluation by metal milling

成果 Achievements

測定と補正による軌跡精度の向上
Improve trajectory accuracy by correction

開発した同時3軸ロボット補正を利用した際の動作例
Example of motion with robot correction system



目標動作時のグラフ。目標直線上に制御できていることが分かる。
Graph for linear motion. It can be seen that the motion was controlled to target line.

現在の化学的除去加工の代替手法としてロボット切削の有効性を提案
Proposal for alternative method of chemical milling

今年度の課題 Challenges for this year

- 本年度はこれまでに開発したロボットシステムを使って、作業面を変えての切削テストや標準加工ワークでの切削テストを行い、評価する。
- In this fiscal year, using the developed robot system, conduct a milling test by changing the work surface and a milling test ISO standard workpieces, and evaluate system accuracy.



垂直面での加工
Milling at vertical surface



ISOワーク
ISO work

9

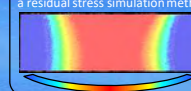
残留応力データの収集と残留応力低減法の開発

Collection of residual stress data (materials, machining) and development of residual stress reduction method

目的 Purpose

切削加工に起因する残留応力や歪みは、加工条件の選定を複雑にし、加工後に手戻り作業を要する原因となる。この残留応力や歪みを予測、制御するために、**残留応力メカニズムの解明と、残留応力シミュレーション手法の開発**を実施する。

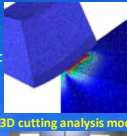
Machining induced residual stress and strain complicate the selection of machining conditions and lead to manual adjustment work. In order to predict and control this residual stress and strain, we will elucidate the residual stress mechanism and develop a residual stress simulation method.




Example of strain distribution on a machined surface & Image of deformation seen from the side

内容 Contents

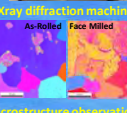
- 3次元の残留応力分布を予測可能な残留応力シミュレーション手法を開発。Developed a residual stress simulation method that can predict the 3D residual stress distribution.
- これまでの研究で開発した2次元切削残留応力解析モデルを基に、加工前の応力分布を導入した3次元切削残留応力解析モデルへと拡張する。Based on the 2D cutting residual stress model developed in the previous research, it will be extended to a 3D cutting residual stress analysis model that introduces the stress distribution before machining.
- 残留応力データを収集し、残留応力メカニズムを解明。Collect residual stress data and elucidate the residual stress mechanism.
- アルミニウム合金圧延材の切削加工について、加工前後の残留応力分布データを収集し、ミクロ組織を観察することで残留応力発生メカニズムを明らかにする。The residual stress generation mechanism due to face milling will be clarified by collecting residual stress distribution data before and after machining and observing the microstructure.



3D cutting analysis model



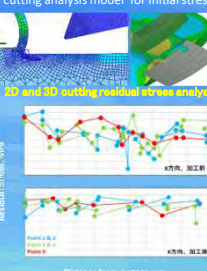
X-ray diffraction machine



Microstructure observation

成果 Achievements

- 2次元切削解析モデルに加工前の材料の初期応力分布を再現し、フェイスミル加工における仕上げ面生成メカニズムを再現した多工程解析を行うことで、高い解析精度が得られた。High accuracy was obtained in 2D cutting analysis model for initial stress distribution & in multi-process model that reproduced the finished surface of face milling.
- フェイスミル加工中の限定領域を再現した3次元切削解析モデルを開発し、その解析精度を検証した。A 3D cutting analysis model was developed that reproduced the limited area during face milling.
- フェイスミル加工前後のX方向及びY方向のデータを測定した。X & Y direction stress was measured for before & after face milling.
- 電解研磨装置を用いて素材の表層から約1mmまで深さ方向のデータを測定した。加工後は表層から約0.5mm深さまでのデータを取得した。Data in the depth direction was measured after electrolytic polishing for before & after face milling condition.



2D and 3D cutting residual stress analysis

Residual stress (MPa)

Direction: 加工前, 加工後

Distance from surface, μm


Residual stress (MPa) before & after face milling

今後の課題 Next Step

残留応力データ収集・シミュレーション手法開発と高難度部材加工プログラムのアルゴリズム提案を合わせて、**最適な加工プログラムを生成する自動化システム**を構築する。By combining the development of residual stress data collection / simulation methods and the "algorithm proposal for high-difficulty member machining programs", we will build an automated system that generates the optimum machining program.

10

高難易度部材加工プログラムのアルゴリズム提案



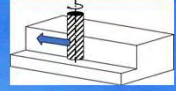
東京大学土屋研究室

Proposal of algorithm for automatic generation of machining program for high difficult-to-cut parts

目的 Purpose

加工の難度判定要素を抽出し、最適加工条件選定手法を確立
Extract cutting difficulty judgment factors and establish the optimum cutting condition selection method

加工現場において加工結果を最適化する加工条件を決定する道筋は、熟練者の経験に頼っている。これを自動化するため、加工現象状態から加工難度を判定し、加工条件や加工工具を最適化して製造工程を決定するアルゴリズムを構築する。



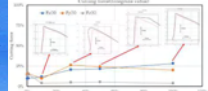
The route to determine the machining conditions for optimizing the machining result in the manufacturing site depends on the experience of experts.

In order to automate this process, we construct an algorithm for determining the machining difficulty from the machining phenomenon state, optimizing the machining conditions and machining tools, and determining the manufacturing process.


内容 Contents

●マシニングセンタでの工具摩耗加速試験
Tool wear acceleration test on machining center

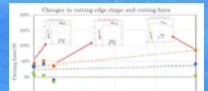
2つの刃先摩耗の加速試験を実施した。1つは鉄系金属切削を行い、他方は刃先を砥石で摩耗させた。アルミ合金の切削したところ、いずれも切削抵抗変化と残留応力が変化した。刃先形状の変化と相関があることを確認した。
Two accelerated edge wear tests were performed. In one, the cutting edge was worn by cutting ferrous metal. On the other, the cutting edge was abraded with a whetstone. In both cases, when aluminum alloy was cut, the cutting force change and residual stress changed. It was confirmed that there is a correlation with the change in the shape of the cutting edge.




(a) 切削抵抗、刃先形状の関(鉄系金属切削)
Relationship between cutting distance, cutting force, and cutting edge shape (iron-based cutting)



(b) 残留応力 (鉄系金属切削)
Residual stress (iron-based cutting)



(c) 切削距離と切削抵抗、刃先形状の関(刃先研磨)
Relationship between cutting distance, cutting force, and cutting edge shape (Lapped cutting edge)



(d) 残留応力 (刃先研磨)
Residual stress (Lapped cutting edge)

目標成果 Goal Achievements

加工難度の判定に関する要素を抽出し、最適切削条件を選定する手法を確立し、熟練作業レベルの最適切削条件を目指す。
We will extract the factors related to the judgment of cutting difficulty, establish a method to select the optimum cutting conditions, and aim for the optimum cutting conditions at the level of skilled workers.

2022年度の成果目標
工具の摩耗を加速実験する。刃先形状の変化と切削現象を調査する
Accelerate tool wear. Investigate changes in cutting edge shape and cutting phenomena
刃先の状態に応じた切削条件設定アルゴリズムに関する構想案を創る
Create a concept for the algorithm to calculate the optimum machining parameters depending on the condition of the cutting edge.

今後の課題 Future tasks

今後、得られた工具刃先形状と切削現象の関係から、加工特性の関係を把握してアルゴリズム提案に繋げる。
In the future, we will grasp the relationship between machining characteristics based on the obtained relationship between the shape of the tool edge and the cutting phenomenon, and lead to an algorithm proposal.

11

切削工具コンペ(複合材用工具ベンチマーク)



東京大学土屋研究室

Cutting tool competition (Comparison of tool performance) for composite materials and so on

目的 Purpose

過去の切削試験の知見に基づき試験を行い、切削工具の特性を評価する
Perform tests based on the knowledge of past cutting tests and evaluate the characteristics of cutting tools

複合材用切削工具は、毎年各社から多くの新工具がリリースされている。ユーザーは、それら工具を用い個別の切削試験を実施し評価している。そのため、各種切削工具について切削実験を行い、その特性を評価する。

As for cutting tools for composite materials, many new tools are released every year by each company. Users perform and evaluate individual cutting tests using these tools. Therefore, cutting experiments are conducted on various cutting tools and their cutting characteristics are evaluated.

内容 Contents

●切削実験結果 Cutting result

メカニカルな固定と真空による固定の2つの方式で試験片を固定して試験片を切削して切削抵抗プロファイルから工具特性を調査した
The test piece was fixed by two methods, mechanical fixation and vacuum fixation, and the workpiece was cut to investigate the tool characteristics from the cutting force profile.



メカニカルによる固定
Mechanical fixation



真空による固定
Vacuum fixation



振動が少ない Vibration suppression



振動が多い Vibration generation

切削抵抗測定結果の比較
Compare cutting force measurement profiles

目標成果 Goal Achievements

切削試験による工具特性評価
Tool characterization by cutting test

評価内容
-加工前後の工具を評価(幾何形状測定、観察)
-加工結果の評価
-切削抵抗、切削温度、など



試験用切削工具
Cutting tool used for testing

Evaluation contents
-Evaluate tools before and after machining (geometric shape measurement, observation)
-Evaluation of processing results
Cutting force, Cutting temperature, etc.

今後の課題 Future tasks

工具刃先形状評価方法を確立し、工具特性を評価する
Establish a tool edge shape evaluation method and evaluate tool characteristics

12

